

〔論文〕

二重翼列遠心ファンの空力特性と 騒音に関する研究 (スクロール角及び隔壁の影響)

児玉好雄^{*1} 畠山 真^{*2}
佐々木壮一^{*1} 後藤健一^{*2}

1. はじめに

空調機器や衛生機器などの小型化に伴い、これらの機器内に設置されている熱交換器は従来のものに比べて、縦と横は小さくなっているが同じ性能を出すために高さが高いものが採用されている。このため機器に組み込まれている羽根車の羽根高さ(翼スパン)も熱交換器の高さに応じて高くならざるを得なくなっており、羽根車の入口/出口面積比は0.45~0.6近傍のものが多く用いられている⁽¹⁾。

このように面積比が小さい場合には羽根車の前面シュラウド側の羽根車前縁近傍ではく離や逆流を生じる⁽²⁾。このためファンの空力特性や騒音特性は悪化する。すなわちファンの圧力や流量、効率は低下するようになり、比騒音レベルは高くなる。たとえば、外径が一定の場合、入口/出口面積比を大きくするために、翼弦長を短くすれば幾何平均相対速度が増加し、騒音が高くなる。その結果、比騒音レベルも高くなる。逆に翼弦長を長くすれば、面積比が小さくなり、前面シュラウド近傍の逆流などのために流量と圧力は低下するようになり、比騒音レベルは高くなる結果が得られている^{(3)~(5)}。

本研究では、空力特性を上げ、騒音や比騒音

レベルを低くするという目的に立脚して、上部翼列(前面シュラウド側)と下部翼列(後面シュラウド側)とで異なる内径を有する二重翼列構造の羽根車を製作し、これを有する送風機を二重翼列ファンと名付けた。すなわち、このファンは羽根車の前面シュラウド側の入口面積を拡大し、前面シュラウド近傍における逆流やばく離を低減させて空力特性の改善を図り、併せて騒音レベルの低減化を図ることを目的として開発されたものである。

本研究ではスクロール角と隔壁の位置が二重翼列遠心ファンの空力特性と騒音特性に及ぼす影響について実験を行い、考察した。さらに、これらの両特性に基づいて、最適スクロール角と隔壁の位置について議論した。

2. 主な記号

B : 羽根枚数
 C : 翼弦長 (mm)
 D_i : 羽根車内径 (mm)
 D_o : 羽根車外径 (mm)
 f : 周波数 (Hz)
 K_s : 比騒音レベル (dB)
 L : 軸動力 (W)
 L_r : スパン長さ (mm)
 L_{ru} : 上部翼のスパン長さ (mm)
 L_{rl} : 下部翼のスパン長さ (mm)

* 1 長崎大学 工学部

* 2 長崎大学 大学院

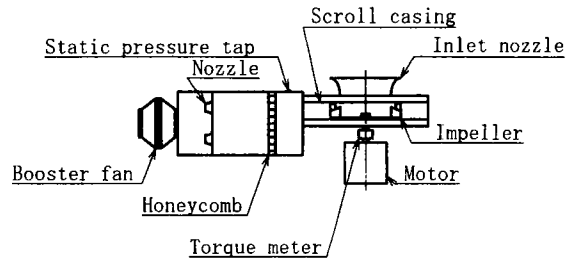
原稿受付日 平成13年4月3日

- N : 動翼の回転数 (rpm)
 P_T : 全圧 (Pa)
 Q : 流量 (m^3/min) または (m^3/s)
 SPL : 音圧レベル (dB)
 U_o : 羽根外縁における周速度 (m/s)
 V_r : 半径方向速度 (m/s)
 W_2 : 羽根車出口の相対速度 (m/s)
 W_m : 幾何平均相対速度 (m/s)
 z : スパン方向の距離 (mm)
 α : スクロール角 (deg.)
 γ_1 : 設計入口角 (deg.)
 γ_2 : 設計出口角 (deg.)
 ζ : 取付角 (deg.)
 η : 送風機効率 $= \phi \varphi / \lambda$
 λ : 動力係数 $= 2L / \{ \pi \rho D_o (L_{rU} + L_{rL}) U_o^3 \}$
 ρ : 空気の密度 (kg/m^3)
 ϕ : 流量係数 $= Q / \{ \pi \rho D_o (L_{rU} + L_{rL}) U_o \}$
 φ : 圧力係数 $= 2P_T / (\rho U_o^2)$

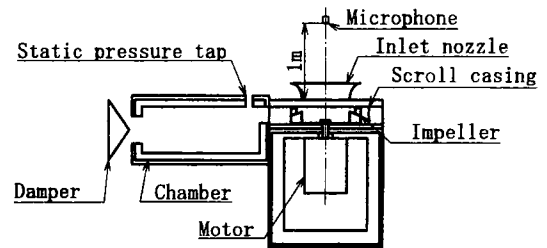
3. 実験装置および方法

Fig. 1 (a)は空力特性測定用①実験装置の概要を示したものである。吸い込み口にはベルマウスが取り付けられており、吐き出し口には縦500mm、横1700mm、高さ500mmの吸音材付きの流量・静圧測定装置が設置されている⁽³⁾。また、軸トルクおよび回転数は磁気式位相差検出方式のトルクメータで測定した。

騒音測定の際には補助ファンの騒音が問題になるので、前述の装置の代わりに長さ1100mm、幅500mm、高さ500mmの無響箱が用いられた (Fig. 1 (b)参照)⁽³⁾。この無響箱には静圧孔とダンパが設けられており、出口端のダンパで流量の調整が行われる。また電動機からの騒音を遮断するために、電動機はフェルト製吸音材が内張りしてあるアルミニウム製の箱に収められており、さらにゴム製遮音材で箱全体を被覆してある。騒音測定は無響室で行っている。騒音測



(a) For aerodynamic characteristic use



(b) For noise measurement use

Fig. 1 Experimental apparatus

定時の暗騒音は30dB(A)以下である。

騒音測定位置は送風機の回転軸中心上のベルマウス入口端から1m上流の点である。騒音計からの出力信号はFFTアナライザを用いて、周波数領域で400点の狭帯域周波数分析がなされた。狭帯域騒音の出力に当たっては、16回の加算平均処理を行った。なお、窓関数はハニングを用いている⁽³⁾。

Fig. 2はスクロールケーシングを示したものである。ケーシングの広がり形状は対数らせんであり、広がり角として3°、4.5°、6°、8°の4種類が用いられた。なお、舌部と羽根車外縁との距離で定義される舌部すきまは6mmである。Fig. 2中のMP1～MP4は羽根車出口の流動様相の測定場所である。この場所は羽根車外半径より10mm大きい半径上に位置している。流動様相の測定には5孔球形ピトー管を用いた。また、MP1～MP4の断面のスパン（羽根高さ）方向の測定位置として5mm間隔の9点を採用した。

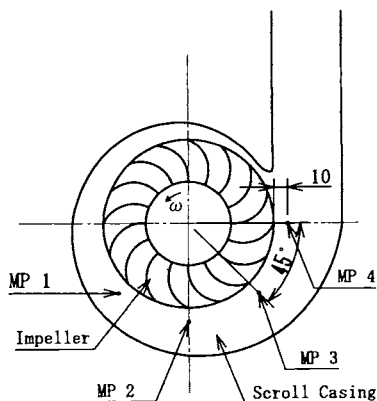


Fig. 2 Scroll casing

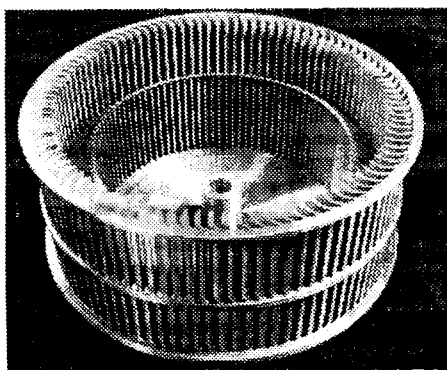
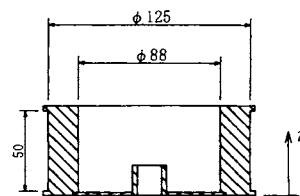


Fig. 3 Dual cascade impeller (DC-impeller)

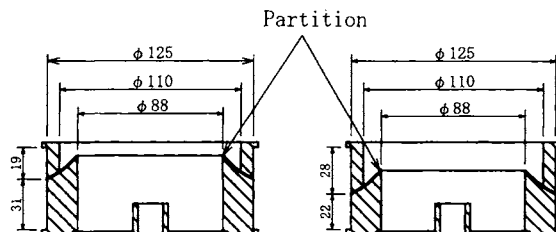
Fig. 3 と Fig. 4 は供試羽根車を示したものである。本研究では3種類の羽根車が用いられたが、いずれの羽根車も外直径は $D_o=125\text{mm}$ の一定としている。また、翼は厚さ 1.6mm の円弧翼である。Fig. 3 は上部翼列と下部翼列の内径が異なる羽根車である。この羽根車を二重翼列遠心羽根車（DC羽根車）と呼び、この羽根車を持つ送風機を以後DCファンと略記する。

Fig. 4 に3種類の供試羽根車の概要を示す。Fig. 4(a)は全スパンにわたって翼弦長が 19mm 、羽根枚数が100枚の羽根車（SC羽根車）である。

Fig. 4(b)はFig. 4(a)の羽根車の入口部の内径を拡大して上部翼列の翼弦長が 9mm 、下部翼列のそれが 19mm の二重翼列羽根車である。した



(a) SC-impeller



(b) DC1931-impeller

(c) DC2822-impeller

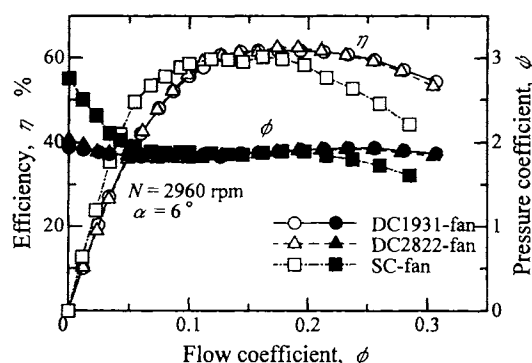
Fig. 4 Test impeller

がって、この羽根車の内径は上部翼列が 110mm 、下部翼列が 88mm となっている。スパン長さは上部翼列が 19mm 、下部翼列が 31mm である。前者と後者の入口設計角が異なるため、この位置における翼に流入する流れを円滑にする目的で両翼列は隔壁で仕切られている。この隔壁の位置はラジアルファンで、前面シュラウドから下側 $1/3$ 以内の領域で逆流が見られた^[3]のを参考にして決めたものである。なお、上部翼列と下部翼列のソリディティを近づけるために、羽根枚数は前者が120枚、後者が100枚となっている。この羽根車をDC1931羽根車と呼ぶ。

また、隔壁の位置がファンの空力特性と騒音特性に及ぼす影響を調べるために、後面シュラウド（ハブ）から約 $2/5$ 上側に隔壁を設置した羽根車を用いた。Fig. 4(c)の羽根車はFig. 4(b)の羽根車の隔壁の位置をハブ側にずらして、上部翼列と下部翼列のスパン長さをそれぞれ 28mm 、 22mm とした羽根車（DC2822羽根車）である。これらの羽根車を有するファンをそれぞれSCファン、DC1931ファン、DC2822ファン

Table 1 Main dimensions of the impeller

Impeller	DC1931		DC2822		SC
	U.C.	L.C.	U.C.	L.C.	
B	120	100	120	100	100
D_o mm	125				
D_i mm	110	88	110	88	88
C mm	9	19	9	19	19
L_r mm	19	31	28	22	50
γ^1 deg	64.7	57.9	64.7	57.9	57.9
γ^2 deg	27.4	35.5	27.4	35.5	35.5
ζ deg	102	97	102	97	97

Fig. 5 Characteristic curves ($\alpha = 6^\circ$)

と呼ぶことにする。

これらのファンの設定回転数 N は2960rpmであり、羽根車外縁における周速度 U_o は約19.6 m/sである。

Table 1にこれら3種類の羽根車の主要諸元を示す。

4. 実験結果および考察

4-1 空力特性

Fig. 5は3種類のファンの特性曲線をスクロール角 $\alpha = 6^\circ$ について示したものである。図中の ϕ 、 φ 、 η はそれぞれ流量係数、圧力係数及び電動機と送風機の総合効率であり、次式で定義される。

$$\phi = Q / \{\pi D_o (L_{rU} + L_{rL}) U_o\}$$

$$\varphi = 2P_r / (\rho U_o^2)$$

$$\lambda = 2L / \{\pi \rho D_o (L_{rU} + L_{rL}) U_o^3\}$$

$$\eta = \phi \varphi / \lambda \quad \dots(1)$$

ここで Q は流量、 D_o は羽根車外直径、 L_{rU} は上部翼のスパン長さ、 L_{rL} は下部翼のスパン長さ、 U_o は羽根車外縁の周速度、 P_r は全圧、 ρ は空気密度、 λ は動力係数、 L は軸動力である。

また、ファンの設計流量点は流量係数でほぼ0.2である。この図から、流量係数 ϕ が0.16以上でファン効率、圧力ともにDCファンがSCファンよりも高く、最高効率点とほぼ同程度の効率を有する流量域も約2倍に拡大する。また、隔壁の位置を変えたDC1931ファン（○印）とDC2822ファン（△印）とでは効率、圧力ともにほとんど同じである。しかしながら、隔壁を前面シュラウドにかなり近づけた場合（ $z/L_r = 0.8$ ）には、効率、圧力ともに低下する（図省略）。

以上のことより隔壁の位置を空力特性の面からのみ判断すれば、隔壁の最適位置として $z/L_r = 0.4 \sim 0.6$ が挙げられる。なお、DC2822ファンの場合は、上部翼列と下部翼列の入口／出口面積比はそれぞれ0.98と0.91である。したがって隔壁の位置を定める一つの目安は、両方の翼列の面積比がほぼ等しく、かつ1に近いことであろう。

SCファンとDCファンを比較すれば、設計点における効率で約7%、圧力係数で0.3、後者が前者より高い。このことは入口／出口面積比の小さいファンの場合には、羽根車上流側の入口部を拡大させることでファン効率や圧力を増加させることができることを示唆するものである。また、流量係数が0.16以上でDCファンがSCファンよりもファン効率と圧力が高い。これは、前者が後者よりも羽根車入口／出口面積比が大きいので、前面シュラウド近傍の逆流やはく離領域が狭くなり、これらに基づく圧力抵抗が減少したためと考えられる。しかしながら、

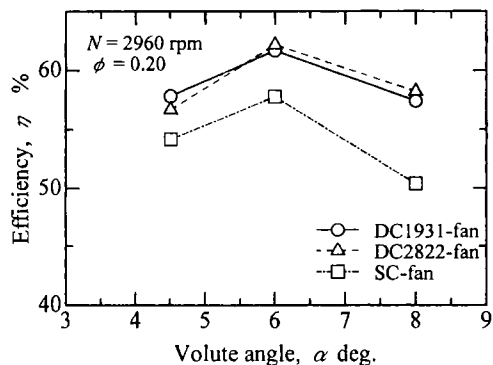


Fig. 6 Effect of volute angle on the fan efficiency

隔壁位置 z/L_r が0.8と大きくなれば、下部翼列の入口／出口面積比がSCファンとあまり差がなくなる。このため、下部翼列における隔壁近傍のはく離領域や逆流領域に基づく圧力損失が大きくなり、圧力および効率が低下したものと考えられる。したがって隔壁の位置には十分配慮する必要がある。

Fig. 6はスクロール角が設計流量点 ($\phi=0.2$) のファン効率に及ぼす影響を示したものである。いずれのファンともスクロール角 α が 4.5° から増加するに従いファン効率は増加し、 $\alpha=6^\circ$ で最大値をとる。これより α が大きくなると逆に低下する。このような傾向を示す要因として、 α が小さいとスクロール内の速度が増加して壁面の摩擦に基づく圧力損失が増大すること、一方、 α が大きくなり過ぎるとスクロール内の半径方向長さが長くなり、二次流れによる乱れに基づく圧力損失が大きくなるため効率が低下することが考えられる⁶⁾。また、DCファンとSCファンの設計点における効率の差はスクロール角 α が大きくなるにつれて広がる。 $\alpha=3^\circ$ の場合は、スクロール内の摩擦損失が大きく、圧力抵抗が増加することが原因で最大流量でさえ設計流量よりかなり小さくなる。このため、Fig. 6には結果を掲載していない。

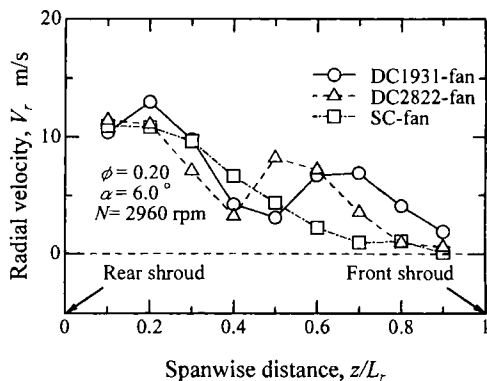


Fig. 7 Distribution of the radial velocity

4-2 羽根車出口の流動状態

Fig. 7は設計流量点 ($\phi=0.2$) における羽根車出口の半径方向速度 V_r の-spanwise方向分布を示したものである。前面シュラウド近傍の速度は入口／出口面積比が小さいSCファン (□印) が最も小さく、次がDC2822ファン (△印) であり、DC1931ファン (○印) が最も大きい。すなわち前面シュラウド近傍の流れは羽根車の入口／出口面積比の影響を強く受けることを示唆している。DC1931ファンでは隔壁近傍において隔壁下面ではなく離れや境界層が発達するために多少の半径方向速度の低下が見られるものの、前面シュラウド近傍では速度は増加しており、SCファンよりかなり改善されている。一方、DC2822ファンでは、前面シュラウドの極近傍でDC1931ファンより速度が低下する傾向が見られるが、SCファンより流れの改善が見られる。

Fig. 8は羽根車出口における相対速度の-spanwise方向分布を設計流量点について示したものである。相対速度と騒音とは密接な関係があり、幾何平均相対速度の6乗に比例する^{1), 3)~5)}。したがって、出口相対速度の増加は騒音の増加に関係するので、十分配慮することが望ましい。この図から、DCファンの場合には、隔壁近傍で速度の増加が見られる。また、相対速度の-spanwise平均値は三者の間でそれほど差はない。

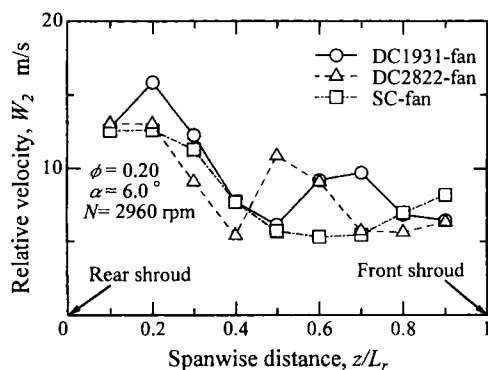


Fig. 8 Distribution the relative velocity at outlet of impeller, W_2

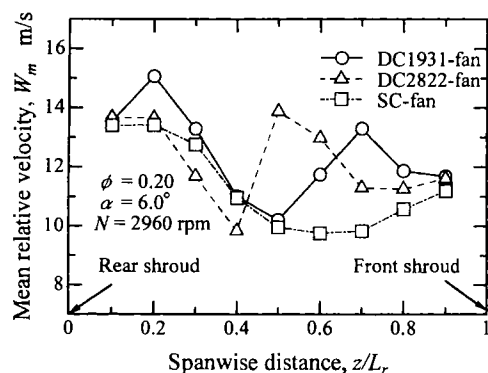


Fig. 9 Distribution of the relative mean velocity, W_m

Fig. 9 は、流れは羽根入口で翼に沿って流れると仮定して算出した入口相対速度と実測で得られた出口相対速度の両者を用いて求めた幾何平均速度のスパン方向分布を3種類の羽根車について示したものである。スパン平均ではDC1931ファン（○印）とDC2822ファン（△印）とはほとんど差はないが、SCファン（□印）は前二者よりわずかに低い。また、前面シュラウド近傍ではDC1931ファン、DC2822ファン、SCファンの順に低くなる。

4-3 騒音のスペクトル分布

Fig.10は設計流量点における騒音のスペクトル分布を3種類のファンについて示したものである。この図に見られるようにスペクトル分布は

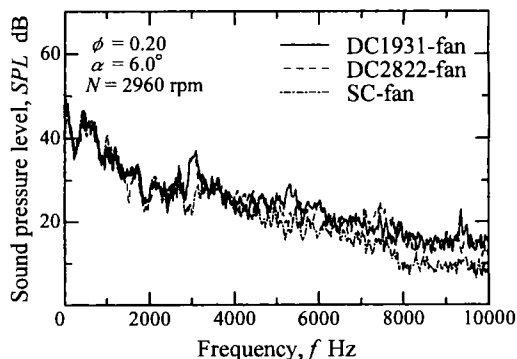


Fig.10 Spectral distribution of the fan noise

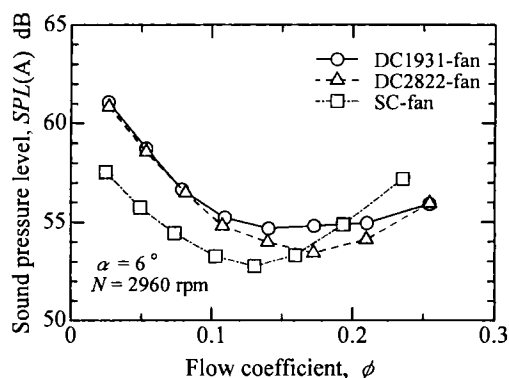


Fig.11 Dependence of the noise characteristics on the flow rate

滑らかであり、羽根通過周波数やその高調波からなる回転騒音の発生はいずれのファンにおいても見られない。また、乱流騒音の高いレベルの周波数域では三者間ではほとんど騒音の差はない。

Fig.11はスクロール角 6° における3種類のファンに関する騒音の流量特性の差異を示したものである。この場合、騒音は騒音計のA特性の結果を用いて示している。SCファンの音圧レベルは締め切り点近傍から流量が増加するに従い次第に減少し、流量係数が0.13近傍で最小値を取る。この点より流量が増加すれば騒音は急激に増加する。一方、DCファンも同様の傾向を示すが、騒音の最小値は流量係数が0.2近傍である。設計点流量（ $\phi=0.2$ ）ではDC1931フ

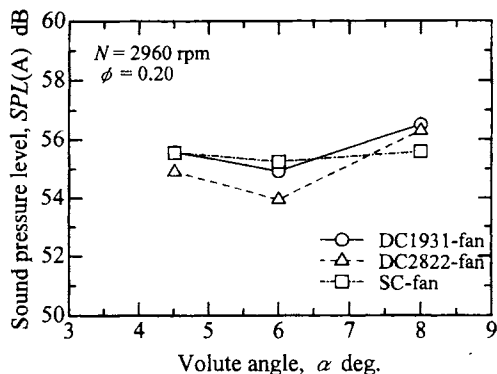


Fig.12 Effects of volute angle on the fan noise

ファンとSCファンはほぼ同じ値を取るが、DC2822ファンは両者よりも若干低い。

相対速度はSCファンがDC2822ファンよりも若干低いにもかかわらず前者が後者より音圧レベルが高い原因として、音響出力に関与するもう一つの因子である後流の幅が挙げられる。すなわち、前者は後者に比べて羽根車入口面積が狭いために、はく離などの影響で前面シュラウド近傍の後流の幅が広がることが一因であろう。したがって、設計点近傍でファンを作動させる場合を考えれば、DCファンはSCファンと同等かそれ以下であり、遜色ないといえる。また、隔壁は $z/L_r=0.4$ 近傍 (DC2822ファン) に設置した方が騒音は若干低くなる。

Fig.12はスクロール角と全帯域騒音との関係について示したものである。設計流量点 ($\phi=0.2$) ではスクロール角 α が増加するに従い騒音は減少し、 α が 6° 近傍で最小値を採る。これより α が増加すると騒音は高くなる。このことより、騒音の面からも最適スクロール角は 6° 近傍に存在するといえる。また、最適スクロール角近傍でDC2822ファンが騒音は最も低く、DC1931ファンとSCファンとでは騒音はほとんど変わらない。このことは二重翼列ファンにすることによってSCファンと同等の騒音が得られることを示すものである。

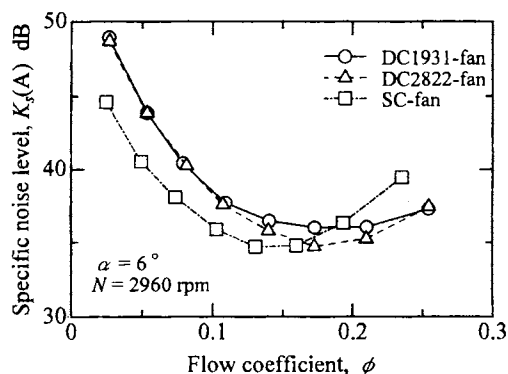


Fig.13 Dependence of the specific noise level on the flow rate

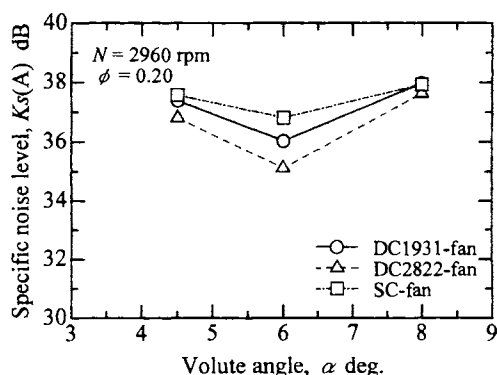


Fig.14 Effect of volute angle on the specific noise level

ファンの良否の一つの目安として次式で与えられる比騒音レベル K_s が用いられる。このレベルが低いほど、良好なファン、または静音ファンと呼ばれている。

$$K_s = SPL - 10 \log_{10}(Q P_r^2) + 2 \quad \dots(2)$$

ここで SPL は音圧レベル (dB)、 Q は流量 (m^3/s) P_r は全圧 (Pa) である。

Fig.13は三種類のファンの比騒音レベルの流量特性を示したものである。比騒音レベルの最小値はDC2822ファン (Δ 印) とSCファン (\square 印) とではほぼ同じであるが、DC1931ファン (\circ 印) は1dBほど高い。また、比騒音レベルの最小値はDCファンがSCファンよりも高流量側にある。

Fig.14はスクロール角と比騒音レベルとの関

係を設計流量点で比較したものである。比騒音レベルはSCファン、DC1931ファン、DC2822ファンの順に低くなる。すなわち、三者間ではDC2822ファンが最も良好であるといえる。

5. 結論

本研究では、スクロール角と隔壁の位置が二重翼列遠心ファンの空力特性と騒音特性に及ぼす影響について実験的に調べた。その結果、以下の結論を得た。

- ① 本実験の範囲では、ファン効率、圧力、比騒音レベルの面からスクロール角 α が 6° 近傍に最適スクロール角が存在する。この角度において、羽根車入口を拡大したDCファンの設計流量点における効率は従来の多翼ファン（SCファン）よりも約7%高い。
- ② 二重翼列羽根車にすることによって、最高効率点とほぼ同等の効率を有する流量域は約2倍に広がる。また、最大流量も若干増える。
- ③ 本実験の範囲では、隔壁の位置は上部翼列の入口／出口面積比と下部翼列のそれがほぼ等しく、かつ面積比が1に近いところ

（ $z/L_r=0.4$ 近傍）に最適位置が存在する。

- ④ DC2822ファンの比騒音レベルの最小値はSCファンの比騒音レベルの最小値とほぼ同じであるが、その最小値は前者が後者より高流量側にある。また、設計流量点における比騒音レベルは前者が後者より低い。

おわりに、本研究費の一部は原田記念財団の研究助成（平成11年度）によったことを記して謝意を表す。

〈参考文献〉

- (1) 児玉・他3名，スクロールレス遠心送風機の騒音に関する研究（羽根前縁と口金壁面間の距離，ベルマウス出口形状および口金すきまの影響），機論（B）63-613（1997），3025.
- (2) Kind, R.J・Tobin, M.G., Flow in a Centrifugal Fan of the Squirrel-Cage Type, Trans. ASME, 112（1990），84.
- (3) 新原・他3名，多翼ラジアルファンの流体力学的特性と騒音特性に関する実験的研究（流体力学的特性と騒音特性に及ぼす羽根車内径，羽根枚数の影響），機論（B）62-602（1996），3642.
- (4) 児玉・他2名，多翼ラジアルファンの乱流騒音の予測，ターボ機械，24-8（1996），477.
- (5) 児玉・他2名，多翼ラジアルファンの乱流騒音の流量特性とその音圧レベル予測，ターボ機械，25-2（1997），65.
- (6) 生井，遠心・軸流送風機と圧縮機，（1968），109，朝倉書店.